区分由气候变化和人类活动引起的黄河流域水储量变化的不同组分

姚 笛[1]， 张子文[2]， 韩卫卫[1]

（1. 濮阳职业技术学院，河南 濮阳 457000；2. 广州交通大学，广东 广州 510725）

摘 要：厘清流域气候变化和人类活动如何影响水储量变化有利于水资源精准管理和保护。以黄河流域为研究区，基于统计模型从降水量和气温中重建0.25°格网尺度气候变化驱动的水储量异常（Climate-driven water storage anomalies，CWSA）信息，并从GRACE重力卫星提供的陆地总水储量异常（Terrestrial water storage anomalies，TWSA）中分离出人类活动驱动的水储量异常（Human-driven water storage anomalies，HWSA）信息。结果表明：（1）黄河流域CWSA整体呈显著上升趋势，流域平均上升速率为3.6 mm·a^{-1}，其变化主要由流域内增加的降水量引起。（2）黄河流域HWSA整体呈显著下降趋势，流域平均下降速率为8.9 mm·a^{-1}，其中下降速率较大的区域集中在中下游地区，造成其下降的主要因素可能是人类活动中的地下水过度抽采。（3）TWSA分别与CWSA和HWSA的相关性分析表明黄河上游源区的TWSA主要受CWSA影响，而在广大中下游地区则受HWSA影响更大。研究通过量化的方式分离了气候变化和人类活动引起的流域水储量变化量，并区分了二者对黄河流域水储量变化的影响。

关 键 词：气候变化；人类活动；水储量变化重建；水储量变化分离

文章编号：1000－6060（2025）02－0190－12（0190～0201）

流域水资源对维持当地生态系统功能、缓解供水压力、实现粮食安全和支持经济增长具有重要意义[1]。当前，受气候变化和人类活动影响的流域水储量变化对水资源的可持续管理带来巨大挑战。提高公众对气候变化和人类活动如何影响流域水储量变化的理解非常重要。由于流域水储量变化一般由气候变化和人类活动共同导致，区分气候变化和人类活动引起的流域水储量变化十分困难，以往的研究也很少尝试定量分离两者对流域水储量变化的影响[2-3]。然而，全面而准确地分析流域内水储量变化的主要驱动力有助于深入理解气候变化和人类活动下不同流域水文过程的作用机理，并为精准的水资源可持续管理提供决策依据，因而具有很高的科学价值和研究意义[4-5]。

在大多数自然状态下，流域通常会同时受到气候变化[6]和人类活动[7]的影响，而区域水储量的最终变化则取决于气候变化与人类活动之间的交互作用。如何定量区分二者引起的流域水储量变化仍然是当前水文研究的一个难题。GRACE重力卫星[8-9]提供的陆地总水储量异常（Terrestrial water storage anomalies，TWSA）数据为解决这一问题提供了新的契机。一般认为GRACE TWSA是气候和人类活动共同驱动的结果，即TWSA=CWSA+HWSA[2-3,10-11]。气候变化驱动的水储量异常（Climate-driven water storage anomalies，CWSA）相对容易表征，可从水文模型的模拟结果中获得，例如陆面模式（Land surface models，LSMs）和全球水文模式（Global hydrologic models，GHMs）等。但不同模式的估计值存在很

收稿日期：2024-03-23； **修订日期：**2024-07-24

基金项目：国家自然科学基金青年基金（61974035）；广东省基础与应用基础研究基金（2021A1515110638）资助

作者简介：姚笛（1981-），男，副教授，主要从事卫星大地测量与地壳形变以及GNSS高精度数据处理与变形监测等方面的研究. E-mail: 10011@pyvtc.edu.cn

通讯作者：韩卫卫（1979-），男，讲师，主要从事无人机测绘和建筑智能化工程技术等方面的研究. E-mail: 10012@pyvtc.edu.cn

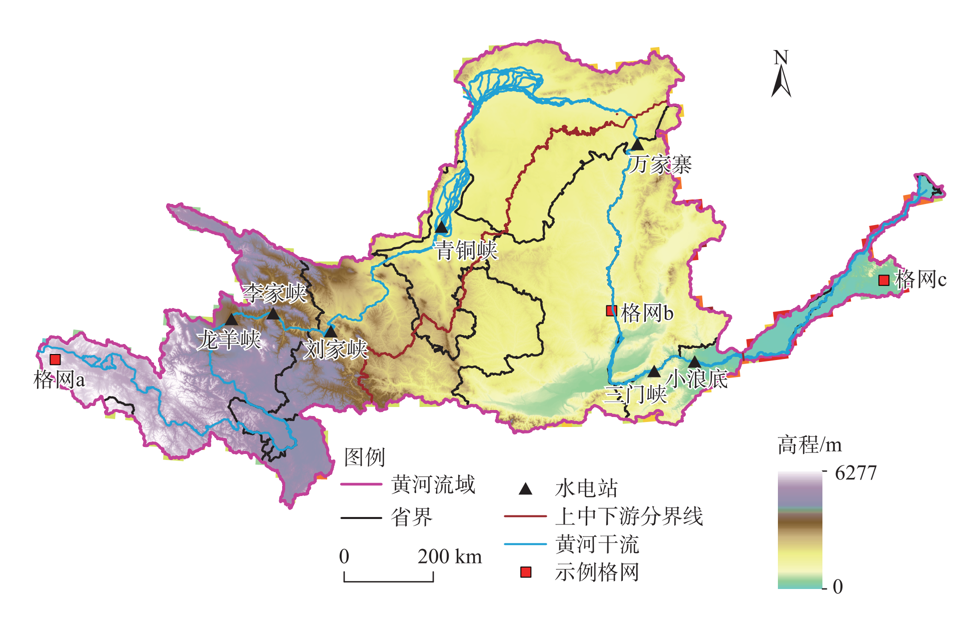
大差异，例如Scanlon等[12]的研究发现6种LSMs和5种GHMs的变化率高达40%~60%，表明模式数据的估计具有高度的不确定性。而近几年新兴的仅用气候因子（如降水量和气温等）驱动的统计模型在重建高精度CWSA的研究中具有巨大优势，已被广泛应用[2,13-14]。而人类活动驱动的水储量异常（Human-driven water storage anomalies，HWSA）较难表征，一方面是因为流域内有关人类活动的统计资料和观测数据难以直接获取；另一方面则是大部分水文模型缺乏表征人类活动对流域水文循环过程影响作用的水文模块，无法全面准确反映出流域在人类活动和气候变化共同作用下的水储量真实变化情况，尤其是在一些有明显人类活动干预的流域[12,15]。因此，有2种主要的表征人类活动引起的流域水储量变化的方法：（1）人类活动对水储量的影响主要体现在地下水抽取、农业灌溉用水增加和水库蓄水、泄洪引起的地表水变化，因此可以基于人口、灌溉农田面积、地下水抽取率和水库调度等资料模拟人类活动引起的水储量变化。（2）采用间接表征HWSA数据的方法，即从GRACE TWSA中减去CWSA，可获得剩余的HWSA组分（HWSA=TWSA−CWSA）。第2种间接表征的方法因其简单易用被广泛采纳[2-3]。

黄河流域人口众多但水资源总量较少，且水资源时空分布不均匀。同时，黄河流域面临着水资源供需矛盾尖锐、生态环境脆弱等问题[16-18]。随着未来用水需求的不断增加，会进一步导致流域农业用水、生活用水紧张态势，制约生产以及社会经济的可持续发展。因此，识别和区分气候变化和人类活动对黄河流域水储量变化的影响，为实行精准的水资源保护措施提供决策支持是非常有必要的。此外，目前的研究大多以整个流域为研究单元来探讨气候变化和人类活动对水储量变化的影响，而缺少对流域内部空间异质性的研究。对于像黄河流域这样覆盖范围广、空间差异大的流域而言，有必要研究流域内部不同区域水储量变化的主导因素，有助于全面而准确地探究流域水储量变化的空间差异。

基于此，本文以黄河流域为研究对象，以全球陆地数据同化系统（Global land data assimilation system，GLDAS）格网化降水量和气温作为气候因子，使用统计模型法重建黄河流域0.25°格网尺度CWSA，并从GRACE TWSA中分离出HWSA，从气候变化和人类活动角度分析黄河流域水储量变化的驱动力，旨在为黄河流域水资源规划管理和生态保护治理提供科学依据和支撑。

1　研究区概况

黄河流域（95°~119°E，32°~41°N）面积约79.5×10^4 km^2，平均海拔超3000 m，地势自西向东逐渐平缓，研究区域地理位置概况详见图1。流域内各个



注：基于自然资源部标准地图服务网站审图号为GS(2024)0650号的标准地图制作，底图边界无修改。下同。

图1　研究区示意图

Fig. 1　Schematic diagram of the study area

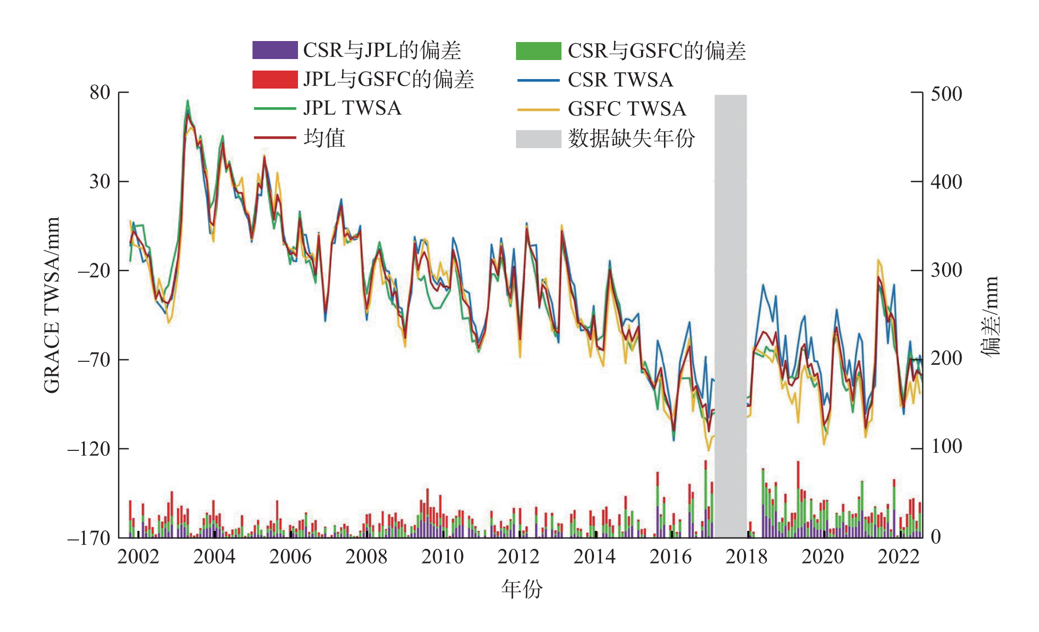
子流域气候类型和地形地貌差异大，上游以高原山地气候为主，中游以温带大陆性气候为主，而下游主要是温带季风气候。黄河流域年均降水量在200~650 mm之间，降雨时空分布不均，夏秋多雨，冬春少雨，6—9月的降水量占比约全年的70%左右。

2 数据与方法

2.1 数据来源及处理

采用GRACE Mascon产品表征TWSA。GRACE Mascon是官方机构推出的新一代GRACE观测数据产品，它无需进行任何后处理过程，使用更加方便[19]。Scanlon等[12]在全球176个流域上对德克萨斯大学空间研究中心（Center for Space Research，CSR）和美国国家航空和宇宙航行局喷气推进实验室（Jet Propulsion Laboratory，JPL）发布的Mascon产品的陆地水储量估计进行了评估，认为Mascon产品比传统球谐系数产品恢复的水文重力信号精度更佳，其中包括黄河流域。GRACE Mascon产品分别由CSR、JPL和戈达德宇宙飞行中心（Goddard Space Flight Center，GSFC）3家机构提供。图2展示了3种GRACE Mascon陆地水储量异常在黄河流域的时间变化趋势（黄河流域所有格网的均值）以及两两偏差，由于3种GRACE Mascon产品的变化趋势很接近，因此为了减少各产品数据的不确定性，本研究参考以往研究的方法使用所有产品的平均值作为最终的陆地水储量异常估计[2]。3种Mascon产品的偏差较小，均在5 cm以内，因此平均后带来的误差在可接受的程度。GRACE产品的时间尺度为2002—2022年，时间分辨率为1个月，为了空间分辨率保持一致，3个产品均重采样至0.25°×0.25°分辨率的格网。采用邻近插值法补齐个别缺失月份的数据。

用于重建CWSA的驱动数据包含降水量和气温，均来源于GLDAS。时间尺度为2002—2022年，时间分辨率为1个月，空间分辨率均为0.25°。LSMs结合卫星和地面观测数据近乎实时地模拟地表状态和通量场变化，以预测水资源对气候变异的响应。因此从LSMs中获取的水储量异常可视为仅受气候变化的影响，并与重建CWSA进行比较。本研究使用的2个LSMs数据分别来自于GLDAS和饥荒预警系统网络陆地数据同化系统[Famine early warning systems network（FEWS NET）land data assimilation system，FLDAS]。GLDAS数据包含植被冠层水、0~200 cm土层深度的土壤水分和雪水当量，而FLDAS数据包含地表水、0~200 cm土层深度的土壤水分以及雪水当量。由LSMs反演的水储量异常可由各层积雪、植物冠层水、地表水和土壤水分之和计算得出。2个LSMs数据的时间分辨率为1个月，空



注：GRACE TWSA为重力卫星提供的陆地总水储量异常；CSR TWSA、JPL TWSA和GSFC TWSA为3家不同机构提供的陆地总水储量异常；CSR为德克萨斯大学空间研究中心；JPL为喷气推进实验室；GSFC为戈达德宇宙飞行中心。下同。

图2 3种陆地水储量异常数据的时间变化趋势对比

Fig. 2 Comparison of temporal trends for the three GRACE Mascon data

间分辨率均为0.25°。

2.2 研究方法

2.2.1 重建气候变化驱动的水储量异常　一般来说，任意地区的陆地水储量变化均遵循水平衡等式：

$$\frac{dH}{dt}=P-ET-R \tag{1}$$

式中：dH/dt 为水储量变化值；P 为降水量，即唯一的水分流入量；ET为蒸散发；R 为径流。ET和 R 为2种水分流出量，2种水分流出量的大小深受降水量和气温的影响。例如，降雨的强度、数量以及持续时间将影响径流的大小，而气温的变化将影响蒸散发的速率。因此大多数地区的水储量可以从降水量和气温中重建。需要强调的是，由于驱动数据仅为降水量和气温，因此重建的水储量结果可以认为是仅由气候变化驱动的水储量变化，而并不包含人为干预的部分。参考Humphrey等[13]和Liu等[2]提出的统计模型在黄河流域0.25°格网尺度上重建2002—2022年的CWSA数据，即：

$$\mathrm{TWS}(t)=\mathrm{TWS}(t-1)\times e^{\tau(t)}+P(t) \tag{2}$$

式中：$\mathrm{TWS}(t)$、$\mathrm{TWS}(t-1)$ 分别为第 t 月、$t-1$ 月重建的CWSA；$P(t)$ 为第 t 月的降水量；$\tau(t)$ 为残余因子，其受第 t 月气温的影响，反映了扣除第 t 月的流出量（即径流、蒸散发量）后仍剩余的水储量比例，即气温越高，残余因子越小，水分残余量越小。残余因子由气温计算而来：

$$\tau(t)=a+b\times T_Z(t) \tag{3}$$

式中：a 和 b 为校准参数且始终为负值；$T_Z(t)$ 为第 t 月气温（T）的转换函数。假设仅当气温高于0 ℃时，残余因子才会对气温敏感：

$$T_Z(t)=\begin{cases}0, & T<0\\ \dfrac{T}{\max(T)}, & T\geqslant 0\end{cases} \tag{4}$$

通过此项转换，当气温变高（低）时，T_Z 越接近1（0），残余因子变小（大），$e^{\tau(t)}$ 的范围位于0~1之间。

根据Humphrey等[13-14]，假设水储量在起始时刻（t=0）处于一个理想化的平衡状态，那么水储量的初始值[即 $\mathrm{TWS}(0)$]可通过降水量和 $e^{\tau(t)}$ 的平均值获得：

$$\mathrm{TWS}(0)=\frac{\mathrm{mean}(P)}{1-\mathrm{mean}[e^{\tau(t)}]} \tag{5}$$

之后，利用去趋势的GRACE TWSA作为TWS基准数据，结合月尺度降水量和气温，采用马尔科夫蒙特卡洛链（The Markov chain Monte Carlo，MCMC）实现对校正参数 a 和 b 的识别，再基于月尺度降水量和气温估算CWSA。

GRACE TWSA去趋势的原因是CWSA仅由降水量和气温驱动，而GRACE TWSA同时包含气候驱动和人为驱动2个部分。因此需要去除GRACE TWSA中人为驱动的部分。而GRACE TWSA观测的水储量异常长期趋势往往是由人类活动造成的，如深层地下水的开采、大型水库的蓄水等，因此需要去除GRACE TWSA的长期趋势。本研究采用集成经验模态分解法（Ensemble empirical mode decomposition，EEMD）去除GRACE TWSA中的长期趋势。EEMD的计算公式为：

$$x(t)=\sum_{i=1}^{n}\mathrm{IMF}_i(t)+R(t) \tag{6}$$

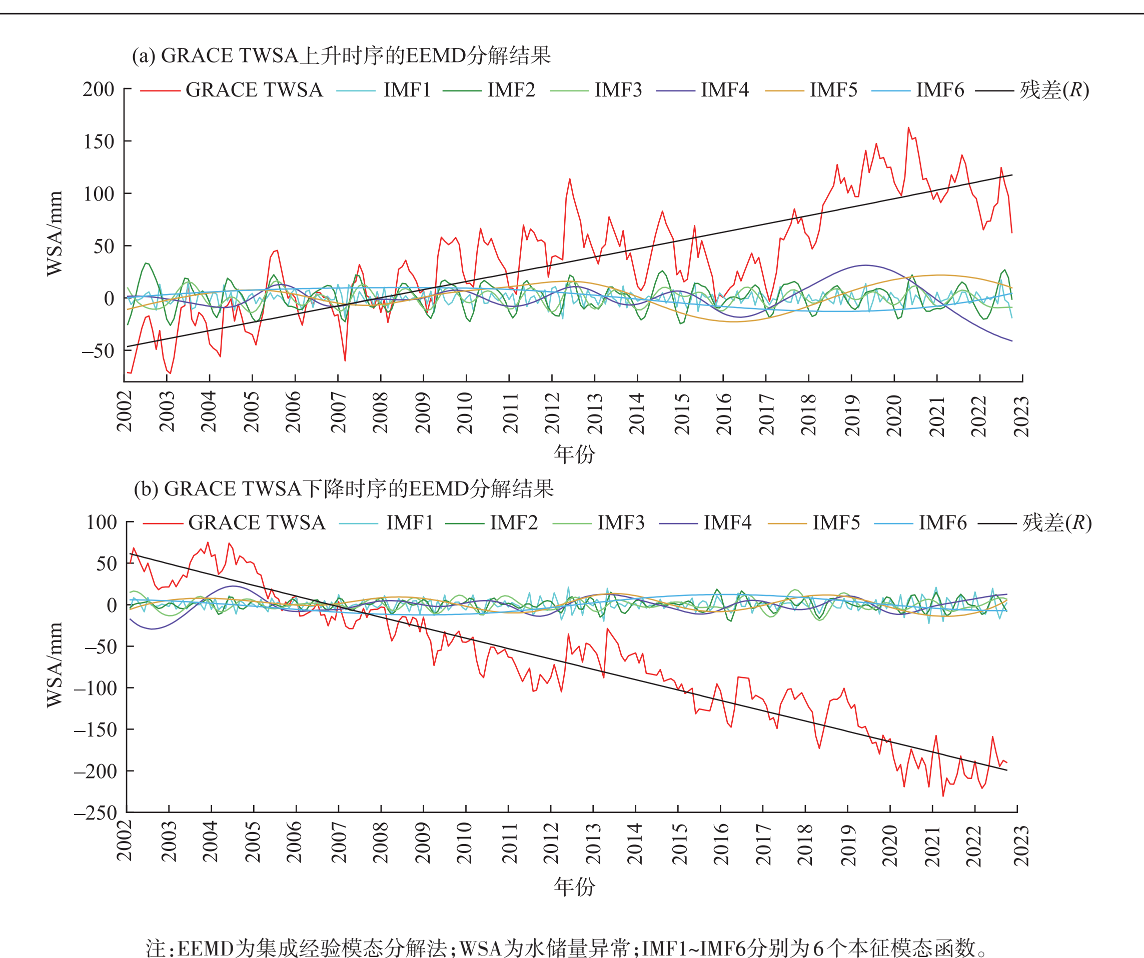
式中：$x(t)$ 为待分解的时间序列，指格网尺度的GRACE TWSA时间序列；$\mathrm{IMF}_i(t)$ 为第 i 个本征模态函数（Intrinsic mode function，IMF）；$R(t)$ 为残差，这是一条单调的或只包含一个极值的曲线，且从中不能提取其他成分；t 为时间；n 为IMF分量的总个数。残差项（也被称为趋势项）被认为是原始时间序列的长期变化趋势（上升或下降）。则去趋势的GRACE $\mathrm{TWSA}_{detrend}$ 可由下式计算得到：

$$\mathrm{GRACE\ TWSA}_{detrend}(t)=\mathrm{GRACE\ TWSA}(t)-R(t) \tag{7}$$

式中：GRACE $\mathrm{TWSA}_{detrend}(t)$ 为第 t 月的去趋势陆地水储量；GRACE $\mathrm{TWSA}(t)$ 为第 t 月陆地水储量原值。

图3给出了2个示例格网基于EEMD分解的GRACE TWSA时间序列的6个本征模态函数和1个残差项。IMF的频率由高到低排列，每个IMF的振幅随时间变化，具有非稳态的特征。IMF1（第一个IMF）包含原GRACE TWSA中最为高频的部分，残差项是通过将所有的IMF移除后获得，在时间尺度上保留了信号潜在的可变性，例如波动上升的GRACE TWSA信号会分离出单调递增的残差项，如图3a所示；波动下降的GRACE TWSA信号会分离出单调递减的残差项，如图3b所示。

本文采用MCMC算法确定公式（3）中的校正参数 a 和 b 的具体数值。MCMC算法从给定的先验分布开始，随机采样新的参数值组合，这些参数值被添加到后验分布中，概率与模型性能的提高成正比。当该算法收敛到一个平衡分布时，该分布便被



注：EEMD为集成经验模态分解法；WSA为水储量异常；IMF1~IMF6分别为6个本征模态函数。

图3　2种不同时间序列信息分解结果

Fig. 3　Decomposition of two different time series information

视为可接受参数集的分布。在参数识别与确定的过程中，需要对相关参数设定合理的边界范围。参考Liu等[2]和Humphrey等[13]，并结合本文情况，设定 a 和 b 的范围为：$-2<a<0$，$-2<b<0$。从公式(3)中可知 T_Z 始终为正，要使气温越高残余因子越小，则参数 a 和 b 的范围应小于0。最终，确定了参数 a 和 b 的具体数值后，基于月尺度降水量和气温代入公式(2)即可获得重建的CWSA数据。MCMC算法的编写在Matlab R2022a中实现。

2.2.2　分离人类活动驱动的水储量异常　本研究采用一种相对简单的方法来分离气候变化和人类活动导致的流域水储量变化。由于GRACE TWSA数据包括气候变化和人类活动的共同贡献，而重建的CWSA仅仅包含气候变化的贡献，因此，可以通过以下公式分离出人类活动导致的水储量变化组分：

$$\mathrm{HWSA} = \mathrm{TWSA} - \mathrm{CWSA} \tag{8}$$

2.2.3　线性趋势分析　本研究用线性回归斜率分析各类水储量异常(CWSA、HWSA和TWSA)的变化趋势，并对其进行 F 检验。其计算公式如下：

$$\mathrm{slope} = \frac{n \times \sum_{i=1}^{n} i \times C_i - \sum_{i=1}^{n} \times i \sum_{i=1}^{n} C_i}{n \times \sum_{i=1}^{n} i^2 - \left(\sum_{i=1}^{n} i\right)^2} \tag{9}$$

式中：slope为回归趋势斜率；C_i 为第 i 月的输入变量；n 为总月份。若slope>0，说明输入变量在研究时段内呈增加趋势，反之呈下降趋势。

由于气候变化驱动的水储量异常仅从降水量和气温中重建，为了探究CWSA和降水、气温的内在联系，本文同时基于线性趋势分析计算了黄河流域各格网降水量和气温的长期变化趋势，并进行 F 检验。

2.2.4　驱动分析　本研究基于皮尔逊相关性分析分别探究CWSA、HWSA和GRACE TWSA之间的关系，利用相关系数大小衡量导致水储量变化的主导因素。

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2 (y_i - \bar{y})^2}} \tag{10}$$

式中：r 为相关系数；$\bar{x}$ 和 $\bar{y}$ 分别为每组数据的平均值；x_i 和 y_i 为两组用于相关性分析的数据；n 为每组数据的长度。

3　结果与分析

3.1　气候变化驱动的水储量异常

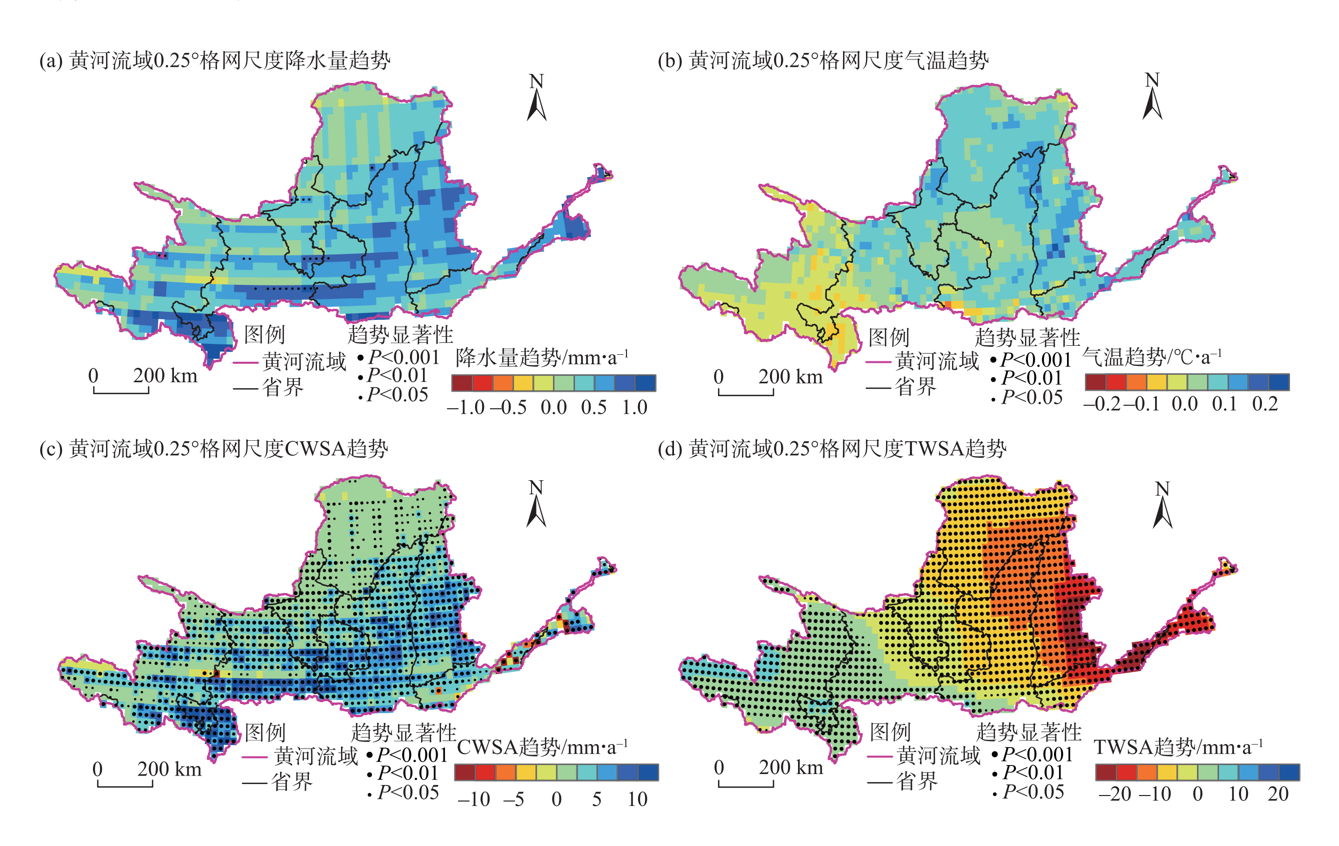
黄河流域的降水量呈上升趋势，平均上升速率约0.5 mm·a^{-1}，中下游的降水量上升速率高于上游(图4a)。黄河流域的气温同样呈现上升趋势，平均上升速率约0.045 ℃·a^{-1}，除上游源区部分格网气温呈下降趋势以外，其余大部分区域的气温均呈现上升趋势(图4b)。黄河流域CWSA整体呈显著上升趋势，平均上升速率约3.6 mm·a^{-1}，且中下游CWSA上升速率高于上游(图4c)。黄河流域TWSA整体呈下降趋势，平均下降速率约5.3 mm·a^{-1}，中下游的陆地总水储量下降速率高，而上游源区的陆地水储量呈轻微增加的态势(图4d)。

为了更清楚展示CWSA与降水量和气温变化趋势的关系，图5a~b分别衡量了黄河流域CWSA趋势和降水量以及气温趋势的相关关系。黄河流域CWSA与降水量趋势相关性高(r=0.68)而与气温趋势相关性弱(r=−0.17)，说明降水量是影响CWSA变化的主要原因，即CWSA随降水量增加(减少)而上升(下降)，而CWSA的变化受气温的影响则相对较小。

为了将CWSA与LSMs获取的水储量异常进行对比，本研究基于线性趋势分析计算了黄河流域各格网LSMs水储量异常的长期变化趋势，对比结果如图6所示。黄河流域CWSA趋势与GLDAS WSA趋势的相关系数为0.42，与FLDAS WSA趋势的相关系数为0.48，表明CWSA与LSMs获取的水储量异常的长期趋势在空间分布上是一致的，也从侧面印证了CWSA的准确性。

3.2　人类活动驱动的水储量异常

分离出的HWSA的趋势如图7所示。黄河流域HWSA整体呈显著下降趋势，平均下降速率为8.9 mm·a^{-1}。HWSA的趋势从上游至下游呈明显的阶梯状分布，其中仅有黄河源区部分区域(如青海)的HWSA呈轻微上升趋势，其他广大的上中下游(如宁夏、内蒙古、陕西、山西、河南和山东)均呈下降趋势。



注：CWSA为由气候变化驱动的水储量异常；TWSA为陆地总水储量异常。下同。

图4　降水量、气温、CWSA和TWSA的长期趋势

Fig. 4　Long-term trends in precipitation, temperature, CWSA and TWSA

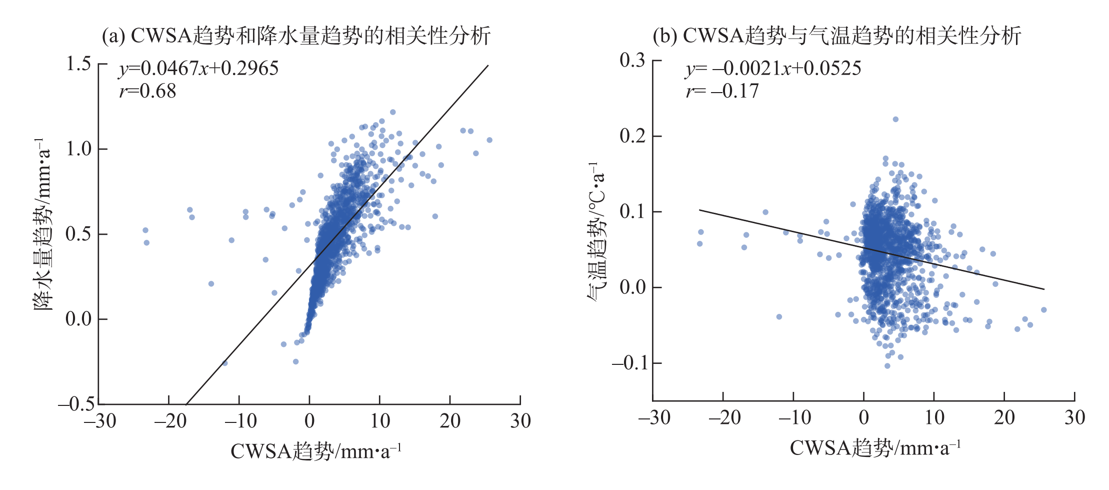
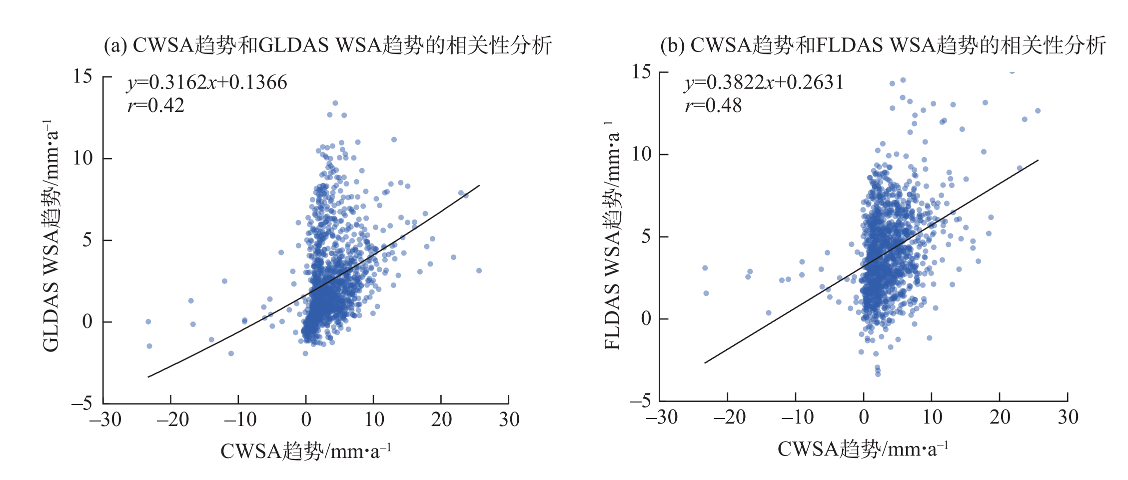


图5 CWSA趋势与降水量和气温趋势的相关性

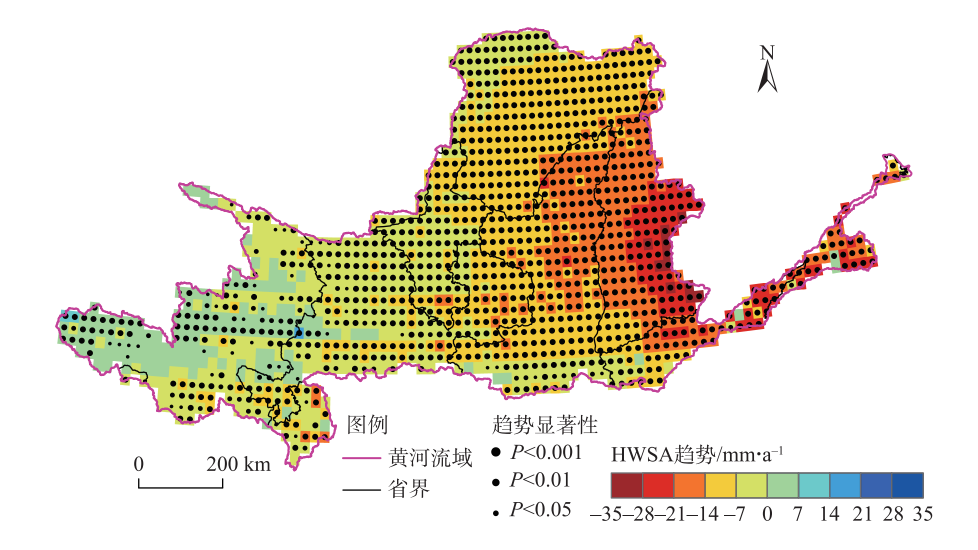
Fig. 5 Correlation of CWSA trends with trends of precipitation and temperature



注:GLDAS WSA为全球陆地数据同化系统提供的水储量异常;FLDAS WSA为饥荒预警系统网络陆地数据同化系统提供的水储量异常。

图6 CWSA趋势与GLDAS WSA和FLDAS WSA趋势的相关性

Fig. 6 Correlation of CWSA trends with trends of GLDAS WSA and FLDAS WSA



注:HWSA为由人类活动驱动的水储量异常。下同。

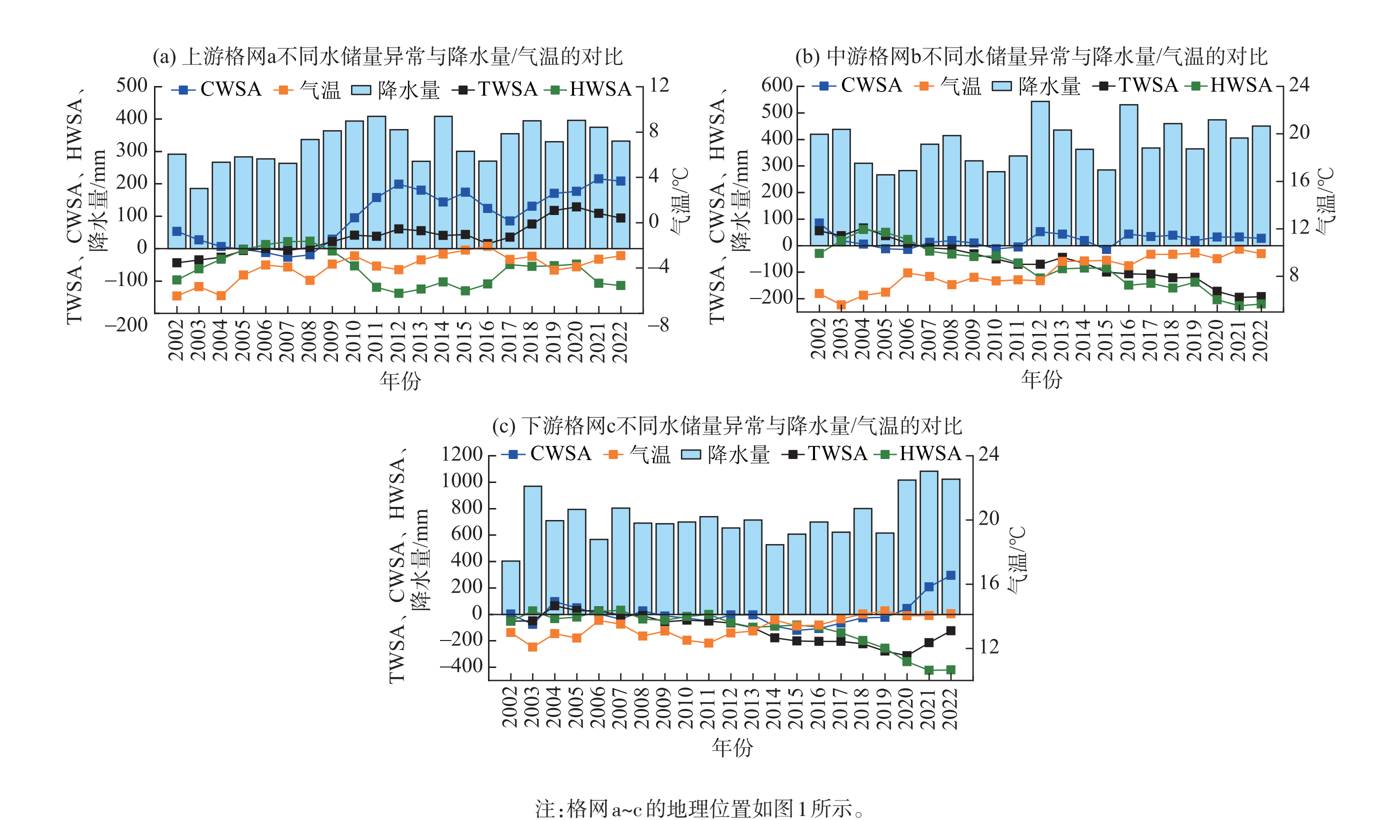
图7 黄河流域格网尺度HWSA趋势

Fig. 7 Trends in grid-scale HWSA in the Yellow River Basin

接下来选取3个格网作为示例，展示格网尺度的CWSA和HWSA的重建情况。为了让格网的选取更有代表性，分别从黄河流域上中下游的不同气候区选取了气候迥异的3个格网，其空间分布如图1所示。图8a格网为高原山地气候；图8b格网为温带大陆性气候；图8c格网为温带季风气候。图8a格网的CWSA呈上升趋势（速率为8.6 mm·a⁻¹），降水量的上升速率为5.3 mm·a⁻¹，气温的上升速率为0.1 ℃·a⁻¹，CWSA的趋势与降水量和气温的趋势保持一致。TWSA同为上升趋势（速率为7.2 mm·a⁻¹），HWSA呈现轻微下降的趋势（速率为3.6 mm·a⁻¹）。图8b格网的CWSA的变化幅度很小，其上升速率仅为0.4 mm·a⁻¹；降水量的上升速率为4.7 mm·a⁻¹；气温变化幅度较大，上升速率为0.2 ℃·a⁻¹；TWSA为下降趋势（速率为11.5 mm·a⁻¹），HWSA同为下降趋势（速率为12.1 mm·a⁻¹），并与TWSA的趋势十分接近。图8c格网的CWSA在2018年前无明显变化，后呈上升趋势（速率为4.1 mm·a⁻¹）；降水量的上升速率为5.3 mm·a⁻¹；气温的上升速率为0.08 ℃·a⁻¹；TWSA在2020年前持续降低，后有所回升，整体下降速率为14.8 mm·a⁻¹；HWSA则为持续下降，整体下降速率达19.1 mm·a⁻¹。

3.3　TWSA分别与CWSA和HWSA的相关性分析

为了探究气候变化和人类活动对黄河流域各格网水储量的影响，本研究分别计算了TWSA与CWSA和HWSA的相关性，结果如图9a和图9b所示。在黄河上游尤其是在源区CWSA和TWSA呈显著正相关（大部分格网的r在0.4以上），表明总水储量随气候驱动的水储量异常上涨而上涨，而在黄河流域上游纬度高于35°的区域，以及黄河流域的中下游，CWSA和TWSA呈负相关关系。黄河上游尤其是源区的HWSA和TWSA呈显著负相关，而在黄河流域上游纬度高于35°的区域，以及黄河流域的中下游，HWSA和TWSA呈显著正相关（大部分格网的r在0.6以上）。为了说明流域具体由哪种水储量异常类型驱动，本研究比较了同一格网的相关系数绝对值，绝对值更大的类型定义为主要驱动类型，统计结果如图9c所示。在黄河上游源区部分，陆地水储量异常主要是受气候变化驱动的水储量异常，而在上游高纬度地区以及中下游地区，陆地水储量异常主要是人类活动驱动的水储量异常。



注：格网a~c的地理位置如图1所示。

图8　3个格网中TWSA、CWSA、HWSA、降水量和气温的时序对比

Fig. 8　Comparison of time series of TWSA, CWSA, HWSA, precipitation and temperature in three different grids

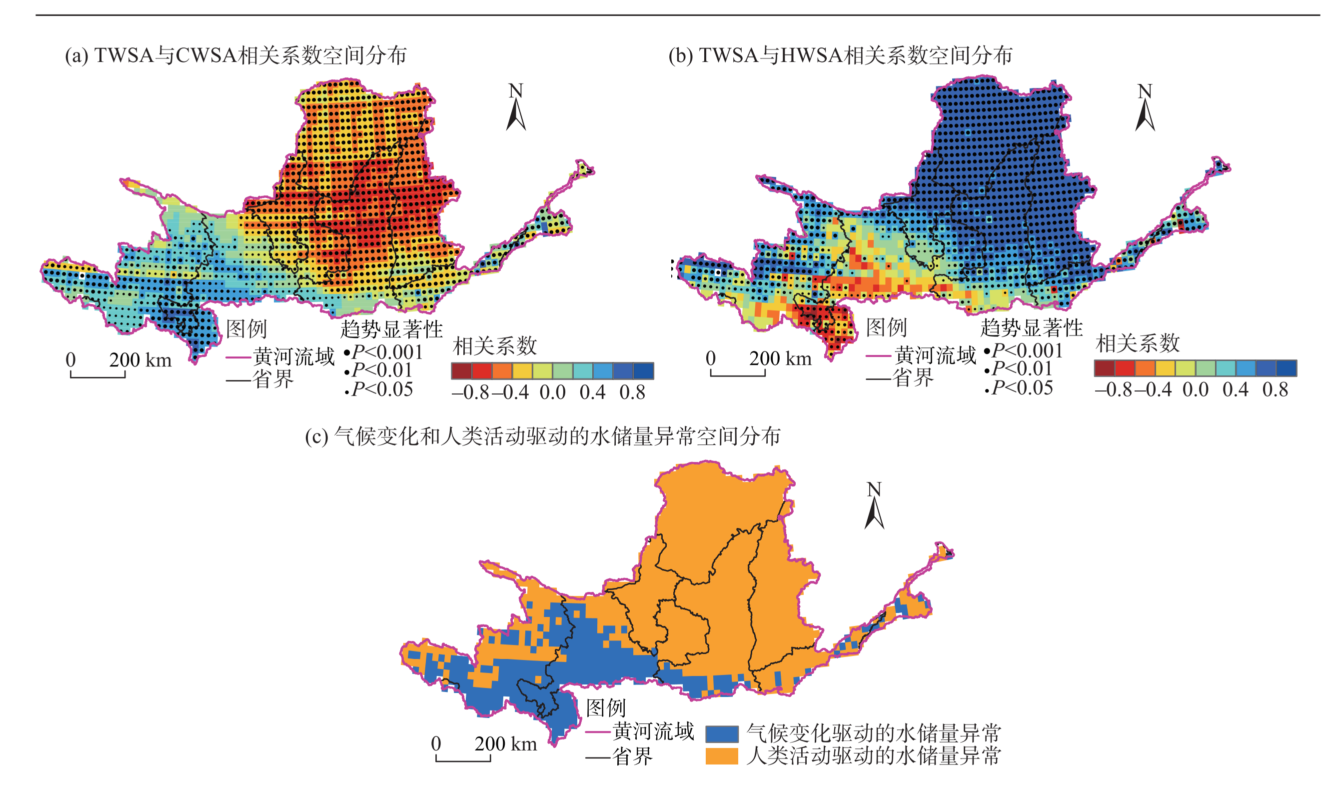


图9 TWSA分别与CWSA和HWSA的相关性分析

Fig. 9 Correlation analysis between TWSA and CWSA/HWSA

4 讨论

本研究以黄河流域为研究区，基于统计模型并利用GLDAS格网化降水量、气温，重建了气候变化驱动的水储量异常信息，并从GRACE陆地水储量异常中分离出了人类活动驱动的水储量异常信息，成功量化了由气候变化和人类活动引起的流域水储量变化量。

结果表明黄河流域CWSA整体呈显著上升趋势，平均上升速率为3.6 mm·a^{-1}，且中下游CWSA上升速率高于上游。研究发现CWSA的趋势与降水量的趋势高度一致，表明降水量在重建过程中发挥主要作用，而气温与CWSA的趋势则无明显相关性。造成上述差异的原因可能是在公式(2)中气温主要通过影响残余因子而间接地影响CWSA的趋势，并非像降水量直接决定CWSA的走势，因此CWSA的趋势与气温的相关性较弱。例如，气温的间接影响体现在黄河上游源区气温持续降低引起蒸发减弱，间接导致CWSA的上升，而中下游地区气温持续升高可能引起降水量增加[20-21]，从而导致CWSA的上升。

黄河流域HWSA的平均下降速率为8.9 mm·a^{-1}，除源区HWSA呈轻微上升趋势以外，其余广大的上中下游HWSA均呈显著下降趋势。造成HWSA广泛下降的主要人类活动可能是地下水超采。黄河流域地表水资源紧张，不足以满足居民和工农业用水需求。以农业活动为例，黄河流域农作物生长期的灌溉需水主要发生在3—6月，然而，约70%的年降水量主要产生在6—9月，因此灌溉用水十分依赖地下水源。长期过度的地下水抽采已经导致黄河流域中下游地区水储量的持续下降，如宁夏、内蒙古和山西的地下水超采造成了6个浅层地下水降落漏斗，而陕西和河南共计有高达18个浅层地下水超采区[22]。黄河源区HWSA上升可能得益于气候变暖导致的冰雪消融以及水库蓄水引起的流域内水储量的增长。黄河上游的龙羊峡、李家峡和刘家峡等大坝可以调节水储量的季节变化，在水库蓄水期间会导致水库上游流域水储量的升高。

TWSA的相关性分析表明黄河上游源区的陆地水储量异常主要由气候变化驱动，而上游高纬度地区以及广大中下游地区的陆地水储量异常则主要受人类活动驱动。造成这一现象的原因是黄河上游源区位于青藏高原，海拔高且气候寒冷，人口稀

少，因此人类活动的影响很小，此地的陆地水储量变化主要由气候变化驱动，其中长期增多的降水量和气候变暖造成的冰雪消融是水储量上升的主要原因。当然黄河源区的水储量异常也同时受到人为干预的影响，比如水库和大坝的修建拦截地表水造成水储量的升高，源区的流域保护政策减少了植被破坏，因此地表涵养水源能力有所增强。而黄河流域中下游则相反，由于中下游地形平坦，人口稠密，工农业发达，因此人类活动的影响占比很大。

本研究在黄河流域重建的CWSA和分离的HWSA结果与Liu等[2]的结果也十分相似。Liu等[2]重建了世界主要流域的CWSA并分离了HWSA，但与他们不同的是本研究的研究尺度为0.25°格网尺度，而非整个流域尺度，因此展示了流域内部的空间差异。Liu等[2]在黄河流域重建CWSA的趋势约为2.0 mm·a^{-1}（本研究中黄河流域各格网CWSA的平均趋势为3.6 mm·a^{-1}），分离HWSA的趋势约为−7.8 mm·a^{-1}（本研究为−8.9 mm·a^{-1}）。

但本研究的重建和分离方法并非对黄河流域所有格网都适用。一般来说，本研究的方法更适用于受人类活动影响更大的区域。例如图8a中位于黄河流域源区的格网受人类活动影响很小，从理论上讲重建CWSA和GRACE TWSA的变化趋势应该十分接近，但该格网的CWSA上升速率高于GRACE TWSA，导致分离出的HWSA呈现下降的趋势，错误指示了人类活动对该区域的影响。本研究中人类活动对流域水储量的影响一般是直接的，而非间接的。因此，图8a格网中可能是人类活动间接导致了黄河源区永久冻土和冰川融化，引起了区域水储量流失。而在图8b~c中受人类活动影响很大的区域里，本研究的方法成功区分了气候变化和人类活动对区域水储量变化的影响。

5　结论和建议

5.1　结论

（1）黄河流域CWSA整体呈显著上升趋势，流域平均上升速率为3.6 mm·a^{-1}，且中下游地区的CWSA上升速率高于上游地区；影响黄河流域CWSA的直接因素是降水量变化，而气温对CWSA的作用以间接为主。

（2）黄河流域HWSA整体呈显著下降趋势，流域平均下降速率为8.9 mm·a^{-1}，除黄河源区HWSA呈轻微上升趋势以外，其余广大的上中下游HWSA均呈显著下降趋势；黄河源区HWSA上升可能得益于气候变暖导致的冰雪消融以及水库蓄水引起的水储量增长，而HWSA广泛下降的主要人类活动可能是地下水超采。

（3）黄河流域上游源区主要由气候变化驱动，而上游高纬度地区以及广大中下游则主要受人类活动驱动；可能的原因是黄河源区气候寒冷，海拔高，人口数量稀少，水储量异常受人类活动的干扰小，而中下游人口稠密，工农业发达，因此受人为干扰大。

5.2　建议

黄河流域不同区域的陆地水储量变化受不同因素影响。基于本文结论，现提出相关对策建议：(1) 针对受气候变化影响较大的黄河源区，应持续加强生态保护以提升应对气候变化的能力，尤其对草地、森林的保护，进一步发挥植被的水文调节和水源涵养能力。(2) 针对受人类活动影响更大的黄河中下游区域，首先应该减少黄河流域地下水资源的过度开发，并开展地下水超采的治理，保障地下水资源及生态安全，通过节水技术以及调整农业结构等措施，减少地下水资源消耗，并通过多渠道增加水源补给，如跨流域调水和河湖地下水回补等方式提高黄河流域地下水资源承载能力，逐步实现地下水采补平衡；其次是加强中下游地区的林草植被修复、水土保持与水沙治理，持续提升黄河流域的水资源承载力。(3) 对于全流域来说，应加强黄河全流域水资源管理，完善跨省区治理的协调机制，建立跨部门协同治理机制，实现各部门之间的紧密合作，明确不同省区职能划分，综合协调上下游、左右岸水资源利用措施，并在国家层面制定相关规定和标准统筹指导。

参考文献（References）

[1]　Latrubesse E M, Arima E Y, Dunne T, et al. Damming the rivers of the Amazon Basin[J]. Nature, 2017, 546(7658): 363−369.

[2]　Liu B, Zou X, Yi S, et al. Identifying and separating climate- and human-driven water storage anomalies using GRACE satellite data[J]. Remote Sensing of Environment, 2021, 263: 112559, doi: 10.1016/j.rse.2021.112559.

[3]　Felfelani F, Wada Y, Longuevergne L. Natural and human-in-

duced terrestrial water storage change: A global analysis using hydrological models and GRACE[J]. Journal of Hydrology, 2017, 553: 105-118.

[4] Huang Y, Salama M, Krol M, et al. Estimation of human-induced changes in terrestrial water storage through integration of GRACE satellite detection and hydrological modeling: A case study of the Yangtze River Basin[J]. Water Resources Research, 2015, 51(10): 8494-8516.

[5] 吕美霞, 马柱国, 李明星. 气候变化、植被改变及人类用水与黄河流域水循环的研究进展[J]. 大气科学学报, 2023, 46(6): 801-812. [Lü Meixia, Ma Zhuguo, Li Mingxing. A review on the changing water cycle of the Yellow River Basin under changes in climate, vegetation, and human water use[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2023, 46(6): 801-812.]

[6] Reager J T, Thomas B F, Famiglietti J S. River basin flood potential inferred using GRACE gravity observations at several months lead time[J]. Nature Geoscience, 2014, 7(8): 588-592.

[7] MacDonald A, Bonsor H, Ahmed K, et al. Groundwater quality and depletion in the Indo-Gangetic Basin mapped from in situ observations[J]. Nature Geoscience, 2016, 9(10): 762-766.

[8] Syed T, Famiglietti J, Rodell M, et al. Analysis of terrestrial water storage changes from GRACE and GLDAS[J]. Water Resources Research, 2008, 44(2): W02433, doi: 10.1029/2006WR005779.

[9] Long D, Yang W, Scanlon B, et al. South-to-North Water Diversion stabilizing Beijing's groundwater levels[J]. Nature Communication, 2020, 11(1): 3665, doi: 10.1038/s41467-020-17428-6.

[10] Pan Y, Zhang C, Gong H, et al. Detection of human-induced evapotranspiration using GRACE satellite observations in the Haihe River Basin of China[J]. Geophysical Research Letters, 2017, 44(1): 190-199.

[11] Karesdotter E, Destouni G, Ghajarnia N, et al. Distinguishing direct human-driven effects on the global terrestrial water cycle[J]. Earths Future, 2022, 10(8): e2022EF002848, doi: 10.1029/2022EF002848.

[12] Scanlon B, Zhang Z, Save H. Global models underestimate large decadal declining and rising water storage trends relative to GRACE satellite data[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2018, 115(6): 1080-1089.

[13] Humphrey V, Gudmundsson L. GRACE-REC: A reconstruction of climate-driven water storage changes over the last century[J]. Earth System Science Data, 2019, 11(3): 1153-1170.

[14] Humphrey V, Gudmundsson L, Seneviratne S I. Global reconstruction of climate-driven subdecadal water storage variability[J]. Geophysical Research Letters, 2017, 44(5): 2300-2309.

[15] Qi W, Liu J, Chen D. Evaluations and improvements of GLDAS2.0 and GLDAS2.1 forcing data's applicability for basin scale hydrological simulations in the Tibetan Plateau[J]. Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 2018, 123(23): 13128-13148.

[16] 成硕, 李艳忠, 星寅聪, 等. 遥感降水产品对黄河源区水文干旱特征的模拟性能分析[J]. 干旱区地理, 2023, 46(7): 1063-1072. [Cheng Shuo, Li Yanzhong, Xing Yincong, et al. Simulation performance of remote sensing precipitation products on hydrological drought characteristics in the source region of the Yellow River[J]. Arid Land Geography, 2023, 46(7): 1063-1072.]

[17] 卓静, 胡皓, 何慧娟, 等. 陕北黄土高原生态脆弱性时空变异及驱动因素分析[J]. 干旱区地理, 2023, 46(11): 1768-1777. [Zhuo Jing, Hu Hao, He Huijuan, et al. Spatiotemporal variation and driving factors of ecological vulnerability in the Loess Plateau of northern Shaanxi[J]. Arid Land Geography, 2023, 46(11): 1768-1777.]

[18] 李海生. 黄河流域生态环境问题系统识别与展望[J]. 环境科学研究, 2024, 37(1): 1-10. [Li Haisheng. Systematic identification and prospect of eco-environmental problems in the Yellow River Basin[J]. Research of Environmental Sciences, 2024, 37(1): 1-10.]

[19] 张岚, 孙文科. 重力卫星 GRACE Mascon 产品的应用研究进展与展望[J]. 地球与行星物理论评, 2022, 53(1): 35-52. [Zhang Lan, Sun Wenke. Progress and prospect of GRACE Mascon product and its application[J]. Reviews of Geophysiscs and Planetary Physics, 2022, 53(1): 35-52.]

[20] Zhang W X, Zhou T J, Wu P L. Anthropogenic amplification of precipitation variability over the past century[J]. Science, 2024, 385: 427-432.

[21] Zhang W X, Furtado K, Wu P L, et al. Increasing precipitation variability on daily-to-multiyear time scales in a warmer world[J]. Science Advances, 2021, 7(31): eabf8021, doi: 10.1126/sciadv.abf8021.

[22] 韩双宝, 李甫成, 王赛, 等. 黄河流域地下水资源状况及其生态环境问题[J]. 中国地质, 2021, 48(4): 1001-1019. [Han Shuangbao, Li Fucheng, Wang Sai, et al. Groundwater resource and eco-environmental problem of the Yellow River Basin[J]. Geology of China, 2021, 48(4): 1001-1019.]

Distinguishing climate- and human-driven water storage anomalies in the Yellow River Basin

YAO Di[1], ZHANG Ziwen[2], HAN Weiwei[1]

(1. Puyang Vocational and Technical College, Puyang 457000, Henan, China;
2. Guangzhou Jiaotong University, Guangzhou 510725, Guangdong, China)

Abstract: Clarifying the impacts of climate change and human activities on water storage changes in a basin is essential for effective water resource management and protection. Using a statistical model, we reconstructed climate-driven water storage anomalies (CWSA) from precipitation and temperature data at a 0.25° grid scale in the Yellow River Basin, China and isolated human-driven water storage anomalies (HWSA) from terrestrial water storage anomalies (TWSA) derived from GRACE satellite data. The results reveal the following trends: (1) CWSA in the Yellow River Basin shows a significant upward trend, with an average increase of 3.6 $mm \cdot a^{-1}$, mainly due to increased rainfall. (2) HWSA in the basin shows a significant downward trend, with an average decrease of 8.9 $mm \cdot a^{-1}$, with higher decreases in the middle and lower reaches, likely driven by excessive groundwater extraction. (3) Correlation analysis indicates that TWSA in the upper Yellow River is primarily influenced by CWSA, while in the middle and lower reaches, it is mainly influenced by HWSA. This study separately quantifies the effects of climate change and human activities on water storage changes in the Yellow River Basin.

Key words: climate change; anthropogenic activities; water storage change reconstruction; water storage change separation